

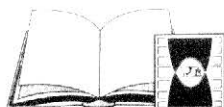
zeszyty naukowe



NAUKI TECHNICZNE - BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

TEROTECHNOLOGIA 2009

Materiały Konferencji
na ekspozycji METAL i CONTROL-TECH
Targi – Kielce (29.09-01.10.2009)



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI ŚWIĘTOKRZYSKIEJ
W KIELCACH

Kielce 2009

ZESZYTY NAUKOWE NR 13

Redaktor Naukowy serii

NAUKI TECHNICZNE: BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

prof. dr hab. inż. Stanisław ADAMCZAK, dr h.c.

Organizatorzy Konferencji

Centrum Laserowych Technologii Metali

Katedra Inżynierii Eksploatacji

Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne

Komisja Świętokrzyska w Kielcach

Komitet Naukowy Konferencji

prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak, dr h.c.

prof. dr hab. inż. Andrzej Niewczas

prof. dr hab. inż. Tomasz Otmianowski

prof. dr hab. inż. Władimir Marcinkowski

prof. dr hab. inż. Włodzisław Tarelnik

dr hab. inż. Bogdan Antoszewski, prof. PŚk

dr hab. inż. Czesław Kundera, prof. PŚk

dr hab. inż. Andrzej Dziadoń, prof. PŚk

dr hab. inż. Ryszard Dindorf, prof. PŚk

dr hab. inż. Dariusz Ozimina, prof. PŚk

dr hab. inż. Leszek Radziszewski, prof. PŚk

dr hab. inż. Jacek Chałupczak, prof. PŚk

dr hab. inż. Mirosław Gajewski, prof. PŚk

dr hab. inż. Tadeusz Orzechowski, prof. PŚk

dr hab. inż. Edward Miko, prof. PŚk

dr hab. inż. Dariusz Janecki, prof. PŚk

dr hab. inż. Sławomir Spadło, prof. PŚk

dr hab. inż. Zygmunt Mucha, prof. PŚk

dr hab. inż. Jurji Szalapko

doc. inż. Emil Evin

dr inż. Norbert Radek

Komitet Organizacyjny Konferencji

dr hab. inż. Bogdan Antoszewski, prof. PŚk

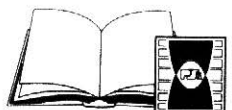
dr hab. inż. Czesław Kundera, prof. PŚk

dr inż. Norbert Radek – sekretarz

Wydrukowano z materiałów dostarczonych przez Autorów.
Artykuły zostały zrecenzowane przez członków Komitetu Naukowego Konferencji.

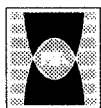
PL ISSN 1897-2683

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2009



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI ŚWIĘTOKRZYSKIEJ
W KIELCACH

25-314 Kielce, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, tel. (0-41) 34 24 581
www.tu.kielce.pl/organizacje/wydawnictwo



KSZTAŁTOWANIE LASEROWE MATERIAŁÓW W PODWYŻSZONYCH TEMPERATURACH

Zygmunt MUCHA¹, Jacek WIDLASZEWSKI²

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano badania nad bezdotykowym kształtowaniem blach i płyt poprzez ogrzewanie wiązką laserową. Przedstawiono model analityczny gięcia z wykorzystaniem gradientu temperatury na grubości materiału. Kąt zgięcia został wyrażony za pomocą trzech parametrów bezwymiarowych: liczby Fouriera, średnicy wiązki odniesionej do grubości materiału i temperatury powierzchni pod wiązką odniesionej do temperatury, przy której materiał traci własności sprężyste. Zbadano wpływ początkowej temperatury materiału na wielkość otrzymywanego kąta zgięcia. Wyniki teoretyczne potwierdzone badaniami doświadczalnymi wykazały, że przy ustalonych parametrach obróbki zależność kąta zgięcia od temperatury początkowej posiada maksimum.

WPROWADZENIE

Poprzez lokalne ogrzewanie materiału wykazującego rozszerzalność termiczną i zdolnego do deformacji plastycznej można w sposób bezdotykowy realizować proces obróbki plastycznej. Precyzyjnym i łatwym do sterowania nośnikiem ciepła jest wiązka laserowa, skąd wywodzi się nazwa kształtowanie laserowe. Zmianę kształtu blach, płyt i rur uzyskuje się przy wykorzystaniu mechanizmów opartych na: gradiencie temperatury na grubości materiału, termicznym wyboczeniu i termicznym spęczeniu [1].

Wpływ początkowej temperatury materiału na otrzymywane kąty zgięcia blach zauważyli Klocke, Demmer i Dietz [2]. Prowadząc eksperymenty laserowego gięcia stali St12 z użyciem wiązki lasera Nd:YAG stwierdzili znaczny wzrost kąta zgięcia przy zwiększaniu temperatury początkowej w zakresie 20 – 175°C w przy-

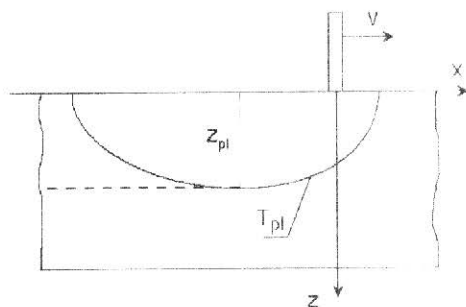
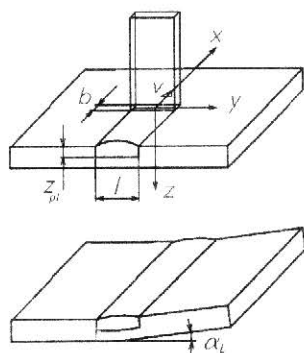
¹ dr hab. Zygmunt Mucha – prof. Politechniki Świętokrzyskiej, Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej i PAN, Aleja Tysiąclecia PP 7, PL – 25-314 Kielce

² dr inż. Jacek Widlaszewski – IPPT PAN, ul. Pawińskiego 5B, PL – 02-106 Warszawa

padku działania mechanizmu wybożeniowego. Yau, Chan i Lee [3] badali zależność kąta zgięcia od liczby przejść wiązki laserowej dla różnych czasów pauzy pomiędzy przejściami. Stwierdzili, że wraz ze zwiększaniem czasu pauzy, otrzymuje się mniejsze kąty zgięcia. W niniejszym artykule przedstawiony jest model analityczny mechanizmu gradientowego i opis wpływu temperatury początkowej na proces gięcia laserowego. Przedstawiono metodykę oraz wyniki badań eksperymentalnych dla weryfikacji modelu analitycznego.

1. MODEL ANALITYCZNY TERMICZNEGO GIĘCIA PŁYT

Podczas modelowanego procesu wiązka laserowa o przekroju prostokątnym o wymiarach $b \times l$ porusza się względem materiału z prędkością v w kierunku osi x układu współrzędnych, który jest związany z wiązką (rys. 1).



Rys. 1. Gięcie laserowe z użyciem wiązki o przekroju prostokątnym: faza nagrzewania i kształt końcowy

Rys. 2. Izoterma temperatury krytycznej T_{pl}

Przy lokalnym nagrzewaniu płyty wiązką laserową pole temperatury praktycznie zawsze jest nieliniowe i powstaje naprężenie termiczne. Wraz ze wzrostem temperatury generalnie występuje spadek naprężenia uplastyczniającego metali i ich stopów. Przy dostatecznie wysokim poziomie wywołwanego naprężenia termicznego pojawia się odkształcenie plastyczne. W modelu wykorzystano pojęcie temperatury krytycznej T_{pl} jako temperatury, przy której materiał traci własności sprężyste. Pojawienie się odkształcenia plastycznego zależy zarówno od składowych naprężenia, jak i od temperatury materiału. Stąd przyjmowana do obliczeń wartość temperatury krytycznej T_{pl} zależy od rodzaju materiału i specyficznych warunków ograniczenia swobody deformacji termicznej.

Prezentowany model teoretyczny opiera się na założeniach upraszczających, szczegółowo przedstawionych w pracach [4, 5, 6]. Najważniejsze założenia to:

1. W fazie nagrzewania, wzdłuż ścieżki laserowej powstaje obszar odkształcenia plastycznego, który ma szerokość równą szerokości wiązki l (rys. 1) i głębokość z_{pl} równą maksymalnej głębokości izotermy krytycznej T_{pl} (rys. 2). Po została część płyty w fazie nagrzewania pozostaje sztywna.
2. Liczba Fouriera dla procesu spełnia warunek $Fo = (\kappa b) / (\sqrt{v} h^2) < 1$, gdzie h – grubość płyty, $\kappa = \lambda / (\rho c)$ – dyfuzyjność termiczna, λ – współczynnik przewodnictwa ciepła, ρ – gęstość, c – ciepło właściwe.
3. Płyta jest modelowana jako belka Bernoulliego-Eulera.
4. Odkształcenie plastyczne podczas spęczania jest obliczane na podstawie współczynnika rozszerzalności termicznej α_{th} i przyrostu temperatury od temperatury początkowej T_0 do temperatury maksymalnej w danym punkcie.

Kąt zgięcia płyty wynika z warunku równowagi sił wewnętrznych po wystąpieniu płyty. Rozkład naprężenia w zagadnieniu z narzuconym odkształceniem plastycznym termicznego spęczania opisuje następujące równanie:

$$\sigma_{xy}(z) = ER_r^C \left(\varepsilon_y^0 + (z - h_{SC})C + R_r^H \alpha_{th} \Delta T(z) H(z_{pl} - z) \right), \quad (1)$$

gdzie: E – moduł Younga; ε_y^0 jest składową odkształcenia reprezentującą jednorodne wydłużenie lub skrócenie płyty w kierunku osi y ; $(z - h_{SC})C$ jest składową odkształcenia reprezentującą deformację giętą; $h_{SC} = h/2$; C – jest krzywizną; $H(x)$ – funkcja Heaviside'a; R_r^H oraz R_r^C – współczynniki sztywności utwierdzenia obszaru odkształceń plastycznych odpowiednio w fazie nagrzewania i chłodzenia [7]. W fazie nagrzewania współczynnik sztywności utwierdzenia $R_r^H = 1$, ponieważ sztywność reszty płyty zapewnia dostatecznie duży opór przeciwko naporowi materiału znajdującego się w stanie uplastycznionym przy podwyższonej temperaturze. W fazie chłodzenia sztywność utwierdzenia jest mała ($R_r^C \ll 1$) przy niemal jednoczesnym skurczu materiału wzdłuż nagrzanej ścieżki.

Przy dostatecznie dużej prędkości v ruchu źródła ciepła, to jest dla $\frac{vb}{2\kappa} \gg 1$, może ono być traktowane jako źródło liniowe o zerowym rozmiarze w kierunku ruchu (x) i skończonej szerokości w kierunku prostopadłym (y) [8]. Przy spełnieniu tego warunku rozkład temperatury można wyrazić zależnością [4, 9]:

$$\Delta T(z) = T(z) - T_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{AP}{\sqrt{\rho c l (z + z_0)}}, \quad (2)$$

gdzie: A – współczynnik absorpcji, P – moc wiązki, $z_0 = \sqrt{\kappa b / (2ev)}$.

Przyrost temperatury powierzchni płyty ($z = 0$) w postaci wymiarowej i bezwymiarowej wyrażają wzory:

$$\Delta T_S = \frac{2AP}{l\lambda} \sqrt{\frac{\kappa}{\pi v b}}, \quad \theta_S = \frac{\Delta T_S}{\Delta T_{pl}} = \frac{2AP}{l\lambda(T_{pl} - T_0)} \sqrt{\frac{\kappa}{\pi v b}}. \quad (3)$$

Warunki równowagi sił wewnętrznych i ich momentów mają postać całek:

$$\int_0^h \sigma_y(z) dz = 0; \quad \int_0^h \sigma_y(z) z dz = 0. \quad (4)$$

Powyższe równania pozwalają na znalezienie odkształcenia wzdłużnego (prostokątnego do ruchu wiązki) ε_y^0 , krzywizny C , a w konsekwencji kąta zgięcia (w radiach), przy założeniu, że jest on mały ($\text{tg} \alpha_b \approx \sin \alpha_b \approx \alpha_b$):

$$\alpha_b = Cl = 6 \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{AP \alpha_{th}}{h^2 \nu \rho c} \left\{ \ln \theta_S - \sqrt{\frac{2}{e}} F_0 [\theta_S - \ln(e \theta_S)] \right\}. \quad (5)$$

W tym równaniu tylko bezwymiarowa temperatura powierzchni θ_S zależy od temperatury początkowej T_0 i dlatego, przy ustalonej liczbie Fouriera F_0 , możemy znaleźć optymalną wartość temperatury θ_S^{opt} powierzchni, przy której kąt zgięcia α_b osiąga wartość maksymalną:

$$\theta_S^{opt} = 1 + \sqrt{\frac{e}{2F_0}}. \quad (6)$$

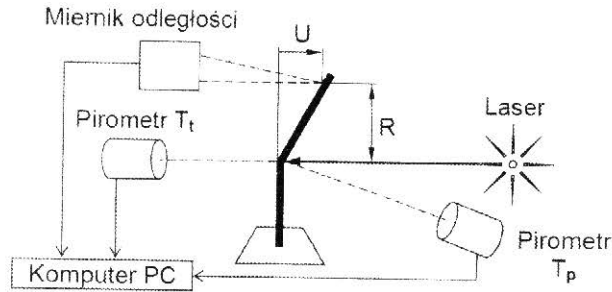
Stąd, biorąc pod uwagę zależności (3), otrzymamy wzór na optymalną wartość początkowej temperatury, przy której kąt zgięcia α_b będzie maksymalny:

$$T_0^{opt} = T_{pl} - 2 \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{AP \kappa}{l\lambda (Fr + 1) \nu h}; \quad Fr = \sqrt{\frac{2\kappa b}{e \nu h^2}}. \quad (7)$$

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

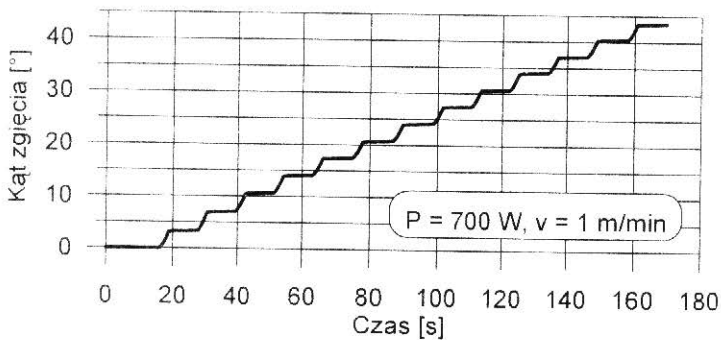
Eksperymenty były prowadzone na próbkach o wymiarach 150 x 50 x 2 mm, wykonanych ze stali nierdzewnej 1H18N9T. Próbki były wstępnie wygrzewane w piecu dla zmniejszenia naprężeń własnych i dla wytworzenia powłoki tlenkowej, która dawała absorpcję energii wiązki laserowej na poziomie 75%. Jako źródło ciepła wykorzystywano laser CO₂ firmy TRUMPF, model TLF 6000, z głowicą ze

z zwierciadłem segmentowym, dającym prostokątny przekrój poprzeczny wiązki. Schemat układu badawczego jest przedstawiony na rysunku 3.



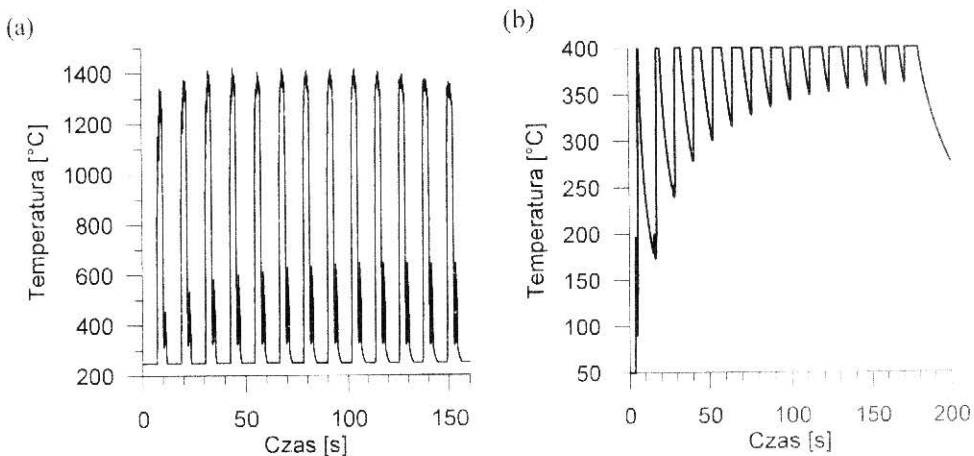
Rys. 3. Schemat układu badawczego

Deformacja próbki była mierzona bezdotykowo przy użyciu laserowego triangulacyjnego miernika przemieszczenia. Kąt zgięcia próbki wyznaczany był z zależności $\alpha_p = \arctg(U/R)$ (rys. 3). Na rysunku 4 jest pokazany przykład przebiegu czasowego kąta zgięcia w serii 13 przejść wiązki laserowej. Pauza pomiędzy kolejnymi przejściami trwała 6 sekund.



Rys. 4. Przebieg kąta zgięcia próbki w serii przejść wiązki laserowej

Temperatura próbki w płamce wiązki była mierzona w sposób ciągły przy użyciu pirometru oznaczonego „ T_p ” na rysunku 3, którego zakres pomiarowy wynosił $250 - 1650^\circ\text{C}$. Pirometr ten był związany z ruchomą wiązką i był wycelowany w środek płamki laserowej. Pozwoliło to rejestrować maksymalną temperaturę próbki podczas nagrzewania laserowego. Przebieg zmian temperatury podczas serii nagrzewania jest przedstawiony na rysunku 5a. Widoczne na wykresie dodatkowe piki temperatury o wartościach szczytowych $500 - 700^\circ\text{C}$ są efektem ubocznym, pochodzącym od nagrzewania wiązką laserową elementu osłonowego.



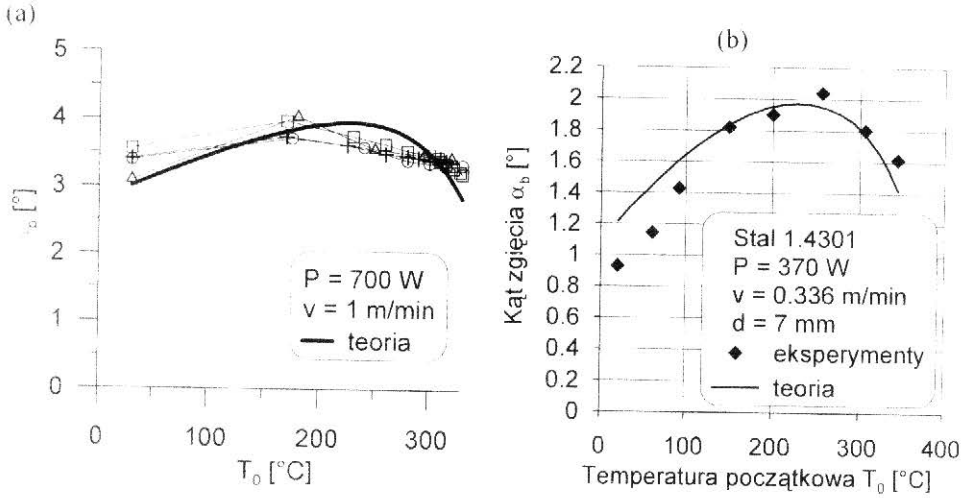
Rys. 5. Przebieg temperatury próbki podczas serii przejść wiązki: (a) w płamce laserowej, (b) na powierzchni tylnej ($P = 700$ W, $v = 1$ m/min)

Do mierzenia początkowej temperatury T_0 materiału zastosowano pirometr oznaczony „ T_i ” na rysunku 3, o zakresie pomiarowym $50 - 400^\circ\text{C}$, związany z próbką i stale wycelowany w jej środek na powierzchni tylnej. Przebieg zmian temperatury mierzonej przez ten pirometr podczas serii nagrzewañ jest przedstawiony na rysunku 5b. Na wykresie widać również zmiany temperatury na skutek nagrzewania się elementu osłonowego i uchwytu próbki.

Przebieg na rysunku 5b pokazuje, że kolejne przejścia wiązki laserowej rozpoczynają się przy rosnących temperaturach początkowych T_0 materiału. Eksperymenty były prowadzone na wielu próbkach i przy różnych czasach pauz.

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Na podstawie przebiegów kąta zgięcia (przykład na rys. 4) wyznaczano przyrosty kąta zgięcia α_b po kolejnych przejściach wiązki laserowej, a na podstawie przebiegów temperatury T_i próbki na powierzchni tylnej (przykład na rys. 5b) wyznaczano początkową temperaturę T_0 materiału przed kolejnym przejściem wiązki. Otrzymane dane pozwoliły na sporządzenie zależności kąta zgięcia α_b od temperatury T_0 . Porównanie zależności teoretycznej (5) i wyników eksperymentalnych dla kilku próbek i różnych czasów pauzy jest przedstawione na rysunku 6a. W obliczeniach przyjęto $T_{pl} = 480^\circ\text{C}$. Wyniki eksperymentalne i zależność teoretyczna pokazują istnienie temperatury początkowej T_0 , przy której uzyskiwana jest maksymalna wartość przyrostu kąta zgięcia dla jednego przejścia wiązki.



Rys. 6. Porównanie doświadczalnej i teoretycznej zależności kąta zgięcia α_b od temperatury T_0 przy podgrzewaniu: (a) lokalnym, (b) jednorodnym

Na rysunku 6b przedstawione są wyniki teoretyczne i eksperymentalne przy podgrzewaniu próbek z użyciem płyty grzewczej. Próbki o grubości 3 mm były wykonane ze stali nierdzewnej 1.4301. Zastosowano wiązkę o przekroju kołowym, średnicy 7 mm, mocy 370 W, przemieszczaną z prędkością 0,336 m/min. Porównanie wyników eksperymentów przy lokalnym podgrzewaniu próbek wiązką laserową (rys. 6a) i przy podgrzewaniu płytą grzewczą (rys. 6b) sugeruje, że na wyniki mogło mieć wpływ niepełne wyrównanie temperatury w przypadku podgrzewania lokalnego.

4. PODSUMOWANIE

W artykule wyprowadzono wzór na optymalną temperaturę początkową materiału ze względu na maksymalizację wartości kąta zgięcia uzyskiwanego w wyniku przejścia wiązki laserowej. Wyniki doświadczalne potwierdziły istnienie takiego optimum. Opracowano metodę prowadzenia eksperymentów dla różnych temperatur początkowych niewymagającą podgrzewania przez dodatkowe źródło ciepła.

LITERATURA

1. Vollertsen F.: *Mechanisms and Models for Laser Forming*. Proc. of LANE '94, Eds.: M. Geiger, F. Vollertsen. Meisenbach-Verlag, Bamberg (1994), pp. 345-360.
2. Klocke F., Demmer A., Dietz C.: *Laser-assisted metal forming*. Proc. of LANE'97, Eds.: M. Geiger, F. Vollertsen, Meisenbach-Verlag, Bamberg 1997, pp. 81-92.
3. Yau C.L., Chan K.C., Lee W.B.: *Laser bending of leadframe materials*. Journal of Materials Processing Technology, 82: (1-3) OCT 1, 1998, pp. 117-121.

4. Mucha Z.: *Modelowanie i eksperymentalne badania kształtowania laserowego materiałów konstrukcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2004.
5. Mucha Z., Widłaszewski J., Cabaj M., Gradoń R.: *Surface temperature in laser forming*. Archives of Thermodynamics. Vol. 24 (2003), No. 2, pp. 89-105.
6. Mucha Z., Widłaszewski J.: *Physical Foundations of Laser Thermal Forming*. Proc. of the 1st Int. Conf. on New Forming Technology, Harbin (China), (2004), pp. 235-240.
7. Taira S., Ohtani R.: *High Temperature Strength of Materials*. Metallurgy Publ., 1986.
8. Rykalin N., Uglov A., Kokora A.: *Laser Machining and Welding*. Mir Publ., 1978.
9. Ashby M.F., Easterling K.E.: *The transformation hardening of steel surfaces by laser beams - I. Hypo-eutectoid steels*. Acta Metall. Vol. 32, No. 11 (1984), pp. 1935-1948.

LASER FORMING OF MATERIALS AT ELEVATED TEMPERATURES

SUMMARY

Studies on touchless bending of metal plates by use of a laser beam are presented. The laser beam is modeled as a heat source of finite dimensions. The analytical approximation by Ashby and Easterling of the temperature field is adopted. The bend angle is analysed as a function of processing parameters, material parameters and the initial material temperature. The dependence of the bend angle on the initial material temperature is derived. Theoretical results are compared with experimental values. Existence of the initial temperature value optimal with respect to the bend angle maximum has been found.

Praca została częściowo wykonana w ramach projektu badawczego N503 012 31/1668 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2006 – 2009.